

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 20520090153308

UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

聚合物太阳能电池用富勒烯电子受体材料
的设计及性能研究

Design and properties of fullerene acceptors for polymer
solar cells

邓林龙

指导教师姓名: 谢素原 教授
专 业 名 称: 无 机 化 学
论文提交日期: 2012 年 6 月
论文答辩时间: 2012 年 6 月
学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: _____
评 阅 人: _____

2012 年 6 月

聚合物太阳能电池用富勒烯电子受体材料的设计及性能研究

邓林龙

指导教师

谢素原
教授

厦门大学



Design and properties of fullerene acceptors for polymer solar cells

A Dissertation Submitted to the Graduate School in Partial Fulfillment of
the Requirements for the Degree of Doctor Philosophy

By

Lin-Long Deng

Supervised by

Prof. Su-Yuan Xie

Department of Chemistry

Xiamen University

June, 2012

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 中文摘要 | i |
| 英文摘要 | iii |
| 第一章 绪 论..... | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 聚合物太阳能电池的发展历史 | 2 |
| 1.3 聚合物太阳能电池的结构 | 3 |
| 1.4 聚合物太阳能电池的基本原理 | 7 |
| 1.5 聚合物太阳能电池器件的性能表征 | 8 |
| 1.6 聚合物太阳能电池材料..... | 10 |
| 1.6.1 给体材料 | 10 |
| 1.6.1.1 聚对苯撑乙烯衍生物 | 10 |
| 1.6.1.2 聚噻吩衍生物 | 11 |
| 1.6.1.3 窄带隙聚合物 | 11 |
| 1.6.2 受体材料 | 13 |
| 1.6.2.1 C ₆₀ 衍生物 | 13 |
| 1.6.2.2 C ₇₀ 衍生物 | 29 |
| 1.6.2.3 C ₈₄ 衍生物 | 33 |
| 1.6.2.4 开笼富勒烯 | 34 |
| 1.6.2.5 内嵌富勒烯 | 36 |
| 1.6.2.6 非富勒烯受体 | 39 |
| 1.7 本课题的提出 | 43 |
| 参 考 文 献 | 45 |
| 第二章 基于 P3HT:PCBM 体系的实验条件的探索 | 59 |
| 2.1 引言 | 59 |
| 2.2 实验部分 | 59 |
| 2.2.1 实验试剂及仪器 | 59 |
| 2.2.2 太阳能电池的制备与测试 | 59 |
| 2.2.3 合成路线 | 60 |
| 2.2.4 产物的表征 | 61 |

| | |
|---|------------|
| 2.3 器件制备条件的探索 | 63 |
| 2.3.1 紫外-臭氧处理 ITO 时间的优化..... | 63 |
| 2.3.2 PEDOT:PSS 厚度的优化..... | 64 |
| 2.3.3 电池退火温度的优化..... | 66 |
| 2.3.4 电池退火时间的优化..... | 68 |
| 2.3.5 P3HT:PCBM 总浓度的影响 | 69 |
| 2.3.6 P3HT:PCBM 比例的影响 | 71 |
| 2.4 本章小结..... | 72 |
| 参 考 文 献..... | 73 |
| 第三章 烷氧基取代的二氢萘基-C₆₀ 衍生物的光伏性能研究 | 75 |
| 3.1 引言 | 75 |
| 3.2 实验部分 | 76 |
| 3.2.1 实验试剂及仪器 | 76 |
| 3.2.2 太阳能电池的制备与测试 | 77 |
| 3.2.3 合成路线 | 77 |
| 3.2.4 产物的表征 | 78 |
| 3.3 结果与讨论 | 90 |
| 3.3.1 紫外-可见吸收 | 90 |
| 3.3.2 电化学性质 | 91 |
| 3.3.3 光伏性能 | 93 |
| 3.3.4 表面形貌研究 | 95 |
| 3.4 本章小结 | 97 |
| 参 考 文 献..... | 98 |
| 第四章 C₆₀(OCH₃)₄ 衍生物的光伏性能研究 | 103 |
| 4.1 引言 | 103 |
| 4.2 实验部分 | 104 |
| 4.2.1 实验试剂及仪器 | 104 |
| 4.2.2 太阳能电池的制备与测试 | 104 |
| 4.2.3 合成路线 | 105 |
| 4.2.4 产物的表征 | 106 |
| 4.3 结果与讨论 | 110 |
| 4.3.1 紫外-可见吸收 | 110 |
| 4.3.2 电化学性质 | 111 |
| 4.3.3 光伏性能 | 112 |

| | |
|---|------------|
| 4.3.4 电子迁移率..... | 115 |
| 4.4 本章小结..... | 116 |
| 参 考 文 献..... | 117 |
| 第五章 苯炔-C₆₀ 二加成产物的光伏性能研究 | 119 |
| 5.1 引言 | 119 |
| 5.2 实验部分 | 119 |
| 5.2.1 实验试剂及仪器 | 119 |
| 5.2.2 太阳能电池的制备与测试 | 120 |
| 5.2.3 合成路线 | 121 |
| 5.2.4 产物的表征 | 121 |
| 5.3 结果与讨论 | 124 |
| 5.3.1 紫外-可见吸收 | 124 |
| 5.3.2 电化学性质 | 124 |
| 5.3.3 光伏性能 | 126 |
| 5.3.4 电子迁移率 | 128 |
| 5.4 本章小结 | 129 |
| 参 考 文 献..... | 130 |
| 第六章 今后工作的展望 | 133 |
| 附 录..... | 134 |
| 致 谢..... | 135 |

Table of contents

| | |
|---|------------|
| Abstract in Chinese | i |
| Abstract in English..... | iii |
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Background | 1 |
| 1.2 Brief history of polymer solar cells | 2 |
| 1.3 Device architectures of polymer solar cells | 3 |
| 1.4 Operating principles of polymer solar cells | 7 |
| 1.5 Characterization of polymer Solar Cell Device..... | 8 |
| 1.6 Photovoltaic materials for polymer solar cells | 10 |
| 1.6.1 Donor materials | 10 |
| 1.6.1.1 Poly(<i>p</i> -phenylene vinylene)..... | 10 |
| 1.6.1.2 Poly(thiophene) | 11 |
| 1.6.1.3 Low bandgap polymer..... | 11 |
| 1.6.2 Acceptor materials..... | 13 |
| 1.6.2.1 C ₆₀ derivatives | 13 |
| 1.6.2.2 C ₇₀ derivatives | 29 |
| 1.6.2.3 C ₈₄ derivatives | 33 |
| 1.6.2.4 Open-cage fullerenes..... | 34 |
| 1.6.2.5 Endohedral fullerenes..... | 36 |
| 1.6.2.6 Non-fullerene acceptors..... | 39 |
| 1.7 The working-out of the subject | 43 |
| References | 45 |
| Chapter 2 Optimization of P3HT:PCBM devices | 59 |
| 2.1 Introduction..... | 59 |
| 2.2 Experimental section | 59 |
| 2.2.1 Reagents and instruments | 59 |
| 2.2.2 Fabrication and characterization of polymer solar cells | 59 |
| 2.2.3 Synthesis route of PCBM | 60 |
| 2.2.4 Characterization of PCBM | 61 |

| | |
|--|----------------|
| 2.3 Optimization of P3HT:PCBM devices | 63 |
| 2.3.1 UV-O ₃ treatment | 63 |
| 2.3.2 Thickness of PEDOT:PSS films | 64 |
| 2.3.3 Annealing temperature | 66 |
| 2.3.4 Annealing time | 68 |
| 2.3.5 Concentration of P3HT:PCBM solution | 69 |
| 2.3.6 Donor/acceptor ratio | 71 |
| 2.4 Conclusions | 72 |
| References | 73 |
| Chapter 3 Photovoltaic performance of alkoxy substituted dihydronaphthyl-C₆₀ derivatives | 75 |
| 3.1 Introduction..... | 75 |
| 3.2 Experimental section | 76 |
| 3.2.1 Reagents and instruments | 76 |
| 3.2.2 Fabrication and characterization of polymer solar cells | 77 |
| 3.2.3 Synthesis route of alkoxy substituted dihydronaphthyl-C ₆₀ derivatives | 77 |
| 3.2.4 Characterization of alkoxy substituted dihydronaphthyl-C ₆₀ derivatives | 78 |
| 3.3 Results and discussion | 90 |
| 3.3.1 UV-vis absorption..... | 90 |
| 3.3.2 Electrochemical properties | 91 |
| 3.3.3 Photovoltaic properties..... | 93 |
| 3.3.4 Surface morphology | 95 |
| 3.4 Conclusions | 97 |
| References | 98 |
| Chapter 4 Photovoltaic performance of C₆₀(OCH₃)₄ derivatives..... | 103 |
| 4.1 Introduction..... | 103 |
| 4.2 Experimental section | 104 |
| 4.2.1 Reagents and instruments | 104 |
| 4.2.2 Fabrication and characterization of polymer solar cells | 104 |
| 4.2.3 Synthesis route of C ₆₀ (OCH ₃) ₄ derivatives | 105 |
| 4.2.4 Characterization of C ₆₀ (OCH ₃) ₄ derivatives | 106 |
| 4.3 Results and discussion | 110 |
| 4.3.1 UV-vis absorption..... | 110 |
| 4.3.2 Electrochemical properties | 111 |

| | |
|---|----------------|
| 4.3.3 Photovoltaic properties | 112 |
| 4.3.4 Electron mobility | 115 |
| 4.4 Conclusions | 116 |
| References | 117 |
| Chapter 5 Photovoltaic performance of benzyne-C₆₀ bisadduct | 119 |
| 5.1 Introduction..... | 119 |
| 5.2 Experimental section | 119 |
| 5.2.1 Reagents and instruments | 119 |
| 5.2.2 Fabrication and characterization of polymer solar cells | 120 |
| 5.2.3 Synthesis route of benzyne-C ₆₀ bisadduct | 121 |
| 5.2.4 Characterization of benzyne-C ₆₀ bisadduct | 121 |
| 5.3 Results and discussion | 124 |
| 5.3.1 UV-vis absorption..... | 124 |
| 5.3.2 Electrochemical properties | 124 |
| 5.3.3 Photovoltaic properties | 126 |
| 5.3.4 Electron mobility..... | 128 |
| 5.4 Conclusions | 129 |
| References | 130 |
| Chapter 6 Propects of future work..... | 133 |
| Appendix..... | 134 |
| Acknowledgements..... | 135 |

摘要

目前世界上消耗的能源，80%以上来自化石燃料的燃烧，但是，化石燃料的燃烧会造成严重的气候和环境问题。为了未来能源的安全，迫切需要发展清洁的、可再生的能源。在各种可再生能源中，太阳能是最有希望的能源之一，它是一种清洁能源，而且取之不尽、用之不竭。

聚合物太阳能电池因其制作工艺简单、成本低、重量轻和柔性好等优点而备受人们的关注。近年来，聚合物太阳能电池取得较快的发展，其中，光伏材料的研究进展起着至关重要的作用，尤其是给体材料的发展带动了聚合物太阳能电池较快的发展。目前，人们主要致力于给体材料的优化，而对受体材料的研究却比较少，以至于目前使用得最普遍的电子受体材料仍然是[6, 6]-苯基-C₆₁-丁酸甲酯(PC₆₀BM)和与其对应的 C₇₀ 衍生物 PC₇₀BM。然而，PC₆₀BM 和 PC₇₀BM 存在一些缺点，比如，与常见的给体材料相比，它们的 LUMO 轨道相对较低；还有，它们在可见区的吸收较弱。因此，设计和合成出具有高的 LUMO 轨道和在可见区具有较强吸收的新型富勒烯衍生物是非常重要的。本论文设计并合成了一系列新型富勒烯衍生物，同时对这些富勒烯衍生物的光学性质、电化学性质和光伏性能进行了研究。

我们根据文献合成出来了高质量的 PC₆₀BM 并用于聚合物太阳能电池。聚(3-己基噻吩) (P3HT):PC₆₀BM 体系是人们研究得最为广泛的光伏体系。目前，基于 P3HT:PC₆₀BM 体系的器件在聚合物太阳能电池中已经被当作参照电池使用。为了掌握聚合物太阳能电池的制备技术，我们制备了基于 P3HT:PC₆₀BM 体系的器件，并对实验条件进行优化。实验结果表明，我们制备的基于 P3HT:PC₆₀BM 体系的电池的性能已经达到文献报道的水平。

我们合成了一类 LUMO 轨道较高的、烷氧基取代的二氢萘基-C₆₀ 衍生物，2-甲氧基-(5,8)-二氢萘基-(6,7)-[6,6]-C₆₀ (MDNC) 以及它的二加成产物 (Bis-MDNC)，并将它们用作聚合物太阳能电池的受体材料。我们同时还研究了各种取代基(甲氧基、苄氧基、苯甲酰氧基、己氧基和 3-乙氧羰基丙氧基)对烷氧基取代的二氢萘基-C₆₀ 衍生物的光伏性能和电化学性质的影响。基于

P3HT:Bis-MDNC 体系的器件的能量转换效率高达 4.58%，开路电压高达 0.83 V；明显优于基于 P3HT:PC₆₀BM 体系的器件(能量转换效率为 3.25%，开路电压为 0.59 V)。这项工作表明，二氢萘基-C₆₀ 衍生物容易通过取代基进行功能化并且可以通过取代基来调节光伏性能。

卤化富勒烯是制备新型富勒烯衍生物的重要的中间体，其中的卤原子可以被合适的有机基团取代。C₆₀Cl₆ 是最常见的富勒烯卤化物之一。从 C₆₀Cl₆ 制备的富勒烯衍生物具有加成基团都围绕着富勒烯碳笼上的一个五元环的结构，而这种结构是通常的环加成反应无法得到的。我们以 C₆₀Cl₆ 为原料合成了两个含有 50 个 π 电子的 C₆₀(OCH₃)₄ 衍生物：C₆₀(OCH₃)₄-PCBM (C₆₀(OCH₃)₄ 的环丙烷富勒烯衍生物，其中 PCBM 为[6,6]-苯基-C₆₁-丁酸甲酯)和 C₆₀(OCH₃)₄-APCBM (C₆₀(OCH₃)₄ 的氮杂环丙烷富勒烯衍生物)。合成的两个 C₆₀(OCH₃)₄ 衍生物的 LUMO 轨道都比 PC₆₀BM 要高，尤其是 C₆₀(OCH₃)₄-PCBM 的 LUMO 轨道比 PC₆₀BM 高 0.3 eV。我们以所合成的 C₆₀(OCH₃)₄ 衍生物作为电子受体，P3HT 作为电子给体，制备了聚合物太阳能电池。虽然两个 C₆₀(OCH₃)₄ 衍生物的结构差别不是很大，但是，它们的光伏性能差别较大。P3HT:C₆₀(OCH₃)₄-APCBM 器件的开路电压为 0.625V，能量转换效率为 1.13%。相比之下，P3HT:C₆₀(OCH₃)₄-PCBM 器件的开路电压为 0.715 V，能量转换效率达 2.22%，该效率差不多是文献报道的基于 P3HT/五取代富勒烯器件的最高效率的两倍。

目前，聚合物太阳能电池中使用的富勒烯受体材料大部分是通过[4+2]环加成或[3+2]环加成反应制备的，还没有关于使用[2+2]环加成产物作受体的报道。我们通过 C₆₀ 与苯炔的[2+2]环加成反应合成了一个新的富勒烯衍生物：苯炔-C₆₀ 二加成产物 (BCBA)。为了研究富勒烯的分子结构与光伏性能的关系，我们制备了基于 P3HT:BCBA 的太阳能电池。P3HT:BCBA 器件的开路电压为 0.691 V，短路电流为 5.34 mA/cm²，填充因子为 46.0%，能量转换效率为 1.70%。实验结果表明，[2+2]环加成产物(BCBA)的光伏性能比[4+2]环加成产物(比如 ICBA)或[3+2]环加成产物(比如 bisPCBM)要差很多，这可能是由于 BCBA 分子中苯环和碳笼之间缺乏共轭造成的。

关键词： 聚合物太阳能电池 富勒烯 电子受体 能量转换效率

Abstract

Currently, more than 80% of the world's energy consumption comes from burning fossil fuels that have had a detrimental effect on climate and the environment. It is urgent to develop clean and renewable energy resources for better energy security in the future. Solar energy is one of the best available alternatives, for it is both clean and abundant.

Polymer solar cells have attracted great attention due to their advantages of easy fabrication, low cost, lightness and flexibility. Materials development has played a vital role in the dramatic improvement of polymer solar cells performance in recent years, and this is driven primarily by the advancement of conjugated polymer donor materials. While most material development efforts have been dedicated to optimizing the donor materials, significantly less attention has been placed on acceptor materials which to date remain dominated by fullerene derivatives [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester(PC₆₀BM) and its corresponding C₇₀ derivative PC₇₀BM. However, PC₆₀BM and PC₇₀BM have some drawbacks such as relatively low LUMO energy levels compared with those of common donors and weak visible absorption. So, it is very important to design and synthesize new fullerene derivatives with up-shifted LUMO energy levels and strong visible absorption for polymer solar cells. In this thesis, a series of fullerene derivatives were synthesized and used as electron acceptors in polymer solar cells. The optical, electrochemical and photovoltaic properties of these fullerene derivatives were also studied.

High quality PC₆₀BM was synthesized according to the literature procedure and used as electron acceptor in polymer solar cells. Poly (3-hexylthiophene) (P3HT):PC₆₀BM is currently the most widely investigated photovoltaic system. Devices based on P3HT:PC₆₀BM now serve as reference cells in polymer solar cells. In order to grasp device fabrication techniques, polymer solar cells based on P3HT:PC₆₀BM were fabricated and optimized. The performance of P3HT:PC₆₀BM

device reached the level reported in the literature.

A class of alkoxy substituted dihydronaphthyl- C_{60} derivatives, such as 2-methoxy-(5, 8)-dihydronaphthyl-(6, 7)-[6, 6]- C_{60} (MDNC) and its bisadduct (Bis-MDNC) with high-lying LUMO level, were synthesized and evaluated as electron acceptors in polymer solar cells. Influence of substituent groups (methyloxy, benzyloxy, benzoyloxy, hexyloxy, and 3-ethoxycarbonylpropyloxy) on photovoltaic and electrochemical properties regarding these fullerene derivatives were studied. Polymer solar cells using Bis-MDNC blend with P3HT as photoactive layer showed power conversion efficiency(PCE) of 4.58% with open-circuit voltage(V_{oc}) of 0.83 V, which is superior to the P3HT:PC₆₀BM control device (3.25% PCE with V_{oc} of 0.59 V). This work exemplifies a facile functionalization and an alterable photovoltaic behavior susceptible to substituent groups in the dihydronaphthyl- C_{60} derivatives.

Halofullerenes are valuable substrates for preparation of novel fullerene derivatives by substitution of halogen atoms with appropriate organic groups. Chlorofullerene $C_{60}Cl_6$ is one of the most available [60]fullerene halides. Fullerene derivatives prepared from $C_{60}Cl_6$ possess all addends attached around one five-membered ring at the fullerene cage; this addition pathway cannot be accessed by commonly used cycloaddition reactions. Herein we reported the application of chlorofullerene $C_{60}Cl_6$ as a substrate for preparation of two 50 π -electron $C_{60}(OCH_3)_4$ derivatives: $C_{60}(OCH_3)_4$ -PCBM (methanofullerene derivative of $C_{60}(OCH_3)_4$, PCBM=[6,6]-phenyl- C_{61} -butyric acid methyl ester) and $C_{60}(OCH_3)_4$ -APCBM (aziridinofullerene derivative of $C_{60}(OCH_3)_4$). The LUMO energy levels of both $C_{60}(OCH_3)_4$ derivatives are higher than that of PC₆₀BM, especially the LUMO energy level of $C_{60}(OCH_3)_4$ -PCBM is 0.3 eV higher than that of PC₆₀BM. Polymer solar cells were fabricated using $C_{60}(OCH_3)_4$ derivative as acceptor and P3HT as donor to evaluate the photovoltaic performance of $C_{60}(OCH_3)_4$ derivative. Although there is little difference in the structure of two $C_{60}(OCH_3)_4$ derivatives, there is a big difference in their photovoltaic performance. The P3HT: $C_{60}(OCH_3)_4$ -APCBM device showed PCE of 1.13% with V_{oc} of 0.625 V. In contrast, the P3HT: $C_{60}(OCH_3)_4$ -PCBM device exhibited PCE of 2.22% with V_{oc} of 0.715 V. The PCE of P3HT:

C₆₀(OCH₃)₄-PCBM device is almost twice as high as that of the best device based on P3HT/penta(organo)[60]fullerene reported in the literature.

Most of the fullerene acceptors used in polymer solar cells were prepared by [4+2] cycloaddition or [3+2] cycloaddition. There is no report about fullerene acceptor prepared by [2+2] cycloaddition. A novel benzyne-C₆₀ bisadduct (BCBA) was synthesized via a [2+2] cycloaddition between C₆₀ and benzyne generated from anthranlic acid. To elucidate the relationship between the molecular structure of fullerene derivative and the performance of solar cell devices, polymer solar cells were fabricated based on blends of BCBA with P3HT. The P3HT:BCBA device showed open-circuit voltage of 0.691 V, short-circuit current of 5.34 mA/cm², fill factor of 46.0% and power conversion efficiency of 1.70%. The result reveals that [2+2] cycloaddition product (BCBA) exhibited worse photovoltaic performance than [4+2] cycloaddition product (such as ICBA) or [3+2] cycloaddition product (such as bisPCBM), which is likely due to lack of conjugation between the phenyl ring and the fullerene core in BCBA molecule.

Keywords: Polymer solar cells; Fullerene; Electron acceptor; Power conversion efficiency.

第一章 绪论

1.1 引言

随着全球对能源的需求日益增加,煤、石油、天然气等传统化石能源很难满足人类社会发展的需要。同时,由于化石能源的日益枯竭,以及在使用过程中会对环境造成严重的污染,因此,人们一直在寻找清洁的、可再生的能源。可再生能源主要包括太阳能、风能、水能、生物质能、地热能和潮汐能等。在各种可再生能源中,太阳能是未来最有希望的能源之一,它取之不尽、用之不竭、且清洁无污染,备受世界各国的青睐。

太阳能的利用方式主要有间接和直接利用两种方式。其中,直接将太阳能转化为电能被认为是最有前途的太阳能利用方式,受到世界各国的重视。太阳能电池是直接将光能转换为电能的装置。1954年,贝尔实验室的研究人员研制成功单晶硅太阳能电池,能量转换效率达6%左右^[1],并由此开创了无机太阳能电池的研究。目前,单晶硅和多晶硅太阳能电池的最高效率分别达到27.6%和20.4%^[2],已经快接近理论上限30%^[3]。多结太阳能电池能更加有效的利用太阳光谱,因此其效率比单结太阳能电池更高。2011年4月,美国的Solar Junction公司宣布其研制的GaInP/GaAs/GaInNAs多结太阳能电池在聚光下(418 suns)效率达43.5%^[2],这是太阳能电池目前最高的效率记录。图1.1列出了在过去35年中,太阳能电池效率的进展情况。尽管无机太阳能电池效率高,但是,由于无机太阳能电池的制造条件苛刻、生产成本高昂,限制其大规模的应用。

聚合物太阳能电池具有加工方法简单、制作成本低、材料来源丰富、易于制备大面积柔性器件、并且可以根据需要进行分子设计等优点,成为人们近年来的研究热点^[4-11]。目前,聚合物太阳能电池的最高效率可达10.6%^[12],这个记录是由日本住友化学(Sumitomo Chemical)携手美国ULCA(University of California, Los Angeles)的Yang Yang教授创立的,上述太阳能电池的转换率已获得美国再生能源实验室(NREL: National Renewable Energy Laboratory)的认可。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库